

## 연안해역에서 비선형 조석으로 인한 해수면 변화 Sea Level Change due to Nonlinear Tides in Coastal Region

정태성\*  
Tae Sung Jung\*

**요 지 :** 우리나라 연안해역에서 조사된 조위 조화상수를 수집하여 조석 분포와 비선형 조석특성의 분포를 조사하고, 국립해양조사원에서 관측한 목포항과 군산외항의 조위자료를 조화분석하여 비선형 조석의 경년변화와 비조화상수(고조위, 저조위, 조차)의 경년변화의 관련성을 검토하였다. 비선형 조석의 발생과 조석형태수가 관련성이 있음을 확인할 수 있었으며, 비선형 분조의 변화는 고조위와 저조위의 변화에 큰 영향을 주었다. 목포항에서는 해안개발로 인해서 비선형 분조의 진폭과 위상이 크게 변화하고, 이로 인해서 고조위가 상승하고, 저조위는 하강하여 조차가 증가하였다. 군산외항에서는 새만금방조제 준공이후에 비선형 조석의 영향으로 고조위는 하강하고, 저조위는 상승하여 조차가 감소하였다.

**핵심용어 :** 비선형 조석, 조석 비대칭, 목포해역의 조석변화, 군산외항의 조석변화

**Abstract :** In coastal region, tidal harmonic constants of semi-diurnal tides and nonlinear tides were collected. The observed tide data of KHOA were analyzed by a tide harmonic analysis method. In the southwestern coasts and Han river estuary, nonlinear tides are clearly generated. The generation of tide non-linearity and tide asymmetry is closely related with tide form factor in Korean coastal zone. Tide non-linearity and asymmetry in Mokpo harbour have increased by a series of coastal development projects. The increase has caused rise of high water level and drop of low water level, and increase of tidal range. In Kunsan Outlet, tidal range has been declined due to inter-annual change of nonlinear tides after completion of Samangeum sea-dyke.

**Keywords :** non-linear tide, tide asymmetry, tide change at Mokpo harbour, tide change at Kunsan Outlet

### 1. 서 론

우리나라 연안해역은 해역에 따라 서로 다른 지형적 특성을 가지고 있으며, 이에 따라 조석특성도 해역에 따라 크게 다르다. 수심이 얇고, 넓은 조간대가 분포하는 서해 연안해역에서는 비교적 높은 조차가 발생하고 있고, 수심이 깊은 동해연안에서는 조차가 매우 적다. 많은 섬들이 분포하고 있는 남해안은 서해안과 유사하게 조간대가 분포하고 있으나 수심이 깊고, 해안선이 단조로운 동해안 보다는 조차가 크지만 서해안 보다는 조차가 작다(Lee, 1983). 최근 해수면 상승과 이로 인한 해안재해가 전국 연안에서 발생하고 있으며(Korea Maritime Institute, 2012; Yoon and Kim, 2012), 지구온난화와 해안개발로 인해서 우리나라 연안해역의 조석특성도 변화하고 있다(Jung, 2016). 조석특성의 변화로 인해서 서해안 저지대의 침수가능성이 증가하고 있는 것으로 알려져 있다(Kang, 1996; Kang et al., 2005a; Jang and Kim, 2009). 우리나라 연안해역에서 바닥마찰과 분조간의 비선형 상호작용에 의해서 생성되는 비선형 조석의 분포와 변화에 대해서

는 그 동안 다수의 연구가 진행된 바 있으나 주로 조석 수치모형(Suh, 1999; Jung, 2011)을 이용하여 연구되어 왔다. 조석 관측결과를 이용해서 평균해수면 변화에 대해서 연구한 사례(Jung, 2014; Kang, 2005; Yoon and Kim, 2012)는 많으나, 조석특성 특히 비선형 조석의 분포와 특성에 대해서 연구한 사례는 많지 않다. 조위 관측자료를 활용하여 비선형 조석을 연구한 사례로는 서해안에서  $M_2$  분조와  $M_4$  분조의 조화상수 변화(Jung and Jeong, 2013)와 목포해역에서 비선형 조석을 포함한 조석특성의 변화(Byun et al., 2004)가 있다.

본 연구에서는 우리나라 연안해역에서 관측된 조석 조화상수를 수집하여 조석특성과 비선형 조석의 공간분포를 파악하고, 비선형 조석이 뚜렷하게 나타나는 목포항과 군산외항에서 관측된 국립해양조사원의 장기간 조위자료를 조화분석하여 조석 조화상수의 시간변화를 조사하고, 비조화상수와의 관련성을 조사하였다. 비선형 분조의 조화상수의 공간분포 분석에는 기존 연구(Jung and Jeong, 2013)에서 활용한 자료에 추가로 국립해양조사원의 국가해양관측망 연간백서(KHOA, 2012~2016)에 수록된 자료, 환경영향평가서보고서, 풍수해저

\*한남대학교 건설시스템공학파(Corresponding author: Department of Civil & Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon 34430, Korea, Tel: +82-42-629-7931, Fax: +82-42-629-8366, jungts@hnu.kr)

감중합계획보고서, 설계보고서 등에 수록된 자료를 수집하여 포함하였다. 비선형 조석이 고조위와 저조위 발생에 미친 영향에 대해서 분석하였으며, 비선형 조석특성이 뚜렷하게 나타나는 군산과 목포에 대해서는 비선형 조석이 고조위, 저조위, 조차에 미치는 영향을 검토하였다.

## 2. 조석특성의 분포

우리나라 연안해역에서 조석특성의 공간분포를 파악하기 위해서 Fig. 1의 181개 정점에서 관측되어 분석된 조석 조화상수를 수집하여 분석하였다. 우리나라 연안해역의 전반적인 조

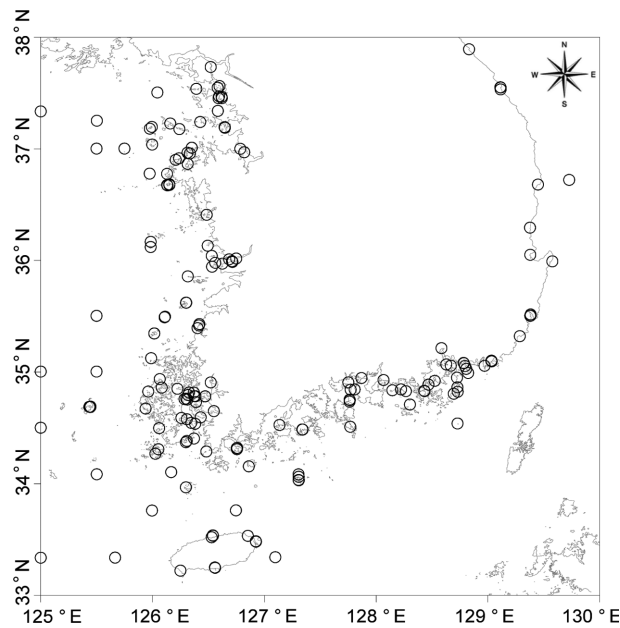


Fig. 1. Stations of collected tidal harmonic constants.

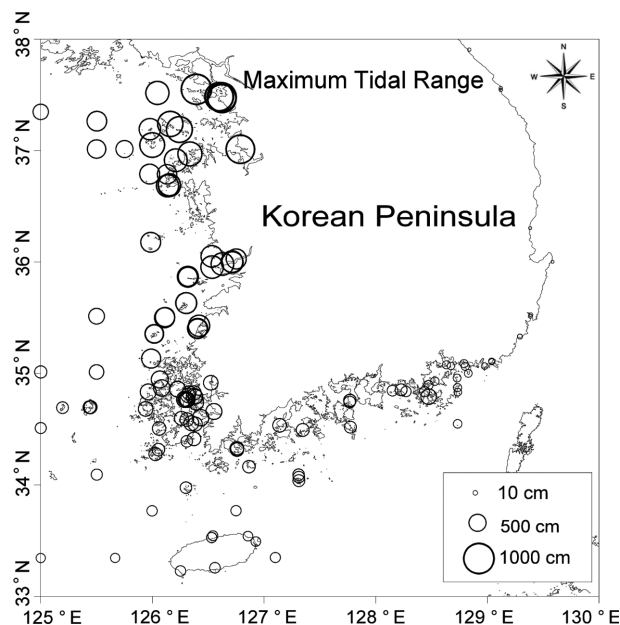


Fig. 2. Spatial distribution of tidal range in spring tide.

석 분포특성을 파악하기 위해서 대조기 조석간만의 차( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  분조의 합성작용에 의한 최대진폭, Fig. 2)를 검토한 결과, 서해안 북쪽 인천해역에서 가장 크고, 남해안을 거쳐 동해안으로 가면서 전반적으로 대조차가 크게 감소하였다. 대조차를 자세히 살펴보면, 인천 앞바다에서 최대 992 cm이고, 서해안에서는 남쪽으로 가면서 감소하고, 남해안은 서쪽에서 동쪽으로 가면서 감소하는 경향을 보였으며, 동해안에서는 조차가 다른 해역에 비해서 매우 작았다. 관측된 대조차의 최소값은 구룡포에서 19.8 cm이며, 이는 구룡포 전면해역에서 주요 분조들의 무조점(분조의 진폭이 0이 되는 지점)이 발생하기 때문이다(Nishida, 1980). 일주조( $K_1$  분조와  $O_1$  분조)와 반일주조( $M_2$  분조와  $S_2$  분조)의 진폭비인 조석형태수(Form Factor)를 이용해서 조석특성을 분류할 수 있다. 조석형태수가 0.25보다 작으면 반일주조형 조석, 0.25보다 크고 1.5보다 작으면 반일주조가 우세한 혼합형 조석, 1.5보다 크고 3보다 작으면 일주조가 우세한 혼합형 조석, 3보다 크면 일주조형 조석으로 분류된다(Pugh, 1987). 조석형태수의 분포(Fig. 3)를 살펴보면, 서해 중부와 북부 연안해역에서는 반일주조형 조석특성을 보였으며, 서해남부와 남해서부 그리고 제주도 인근해역에서는 반일주조가 우세한 혼합형 조석특성을 보였다. 특이하게도 인천해역에서는 반일주조형 조석특성을 보였으나 외해에서는 반일주조가 우세한 혼합형 조석특성을 보였다. 이는 외해에서 발생한 조석이 수심이 얕은 연안해역에서는 진폭이 큰 반일주조는 커지는 현상을 보였으나 일주조는 상대적으로 적게 진폭이 커져서 나타난 현상이다. 남해동부에서는 반일주조형 조석특성을 보였고, 동해 연안해역에서는 전반적으로 일주조의 진폭이 반일주조의 진폭 보다 큰 일주조가 우세한 혼합형 조석특성을 보였다. 조석형태수가 3보다 큰 일주조형 조석은 우리나라 연안해역에서는 관측되지 않았다.

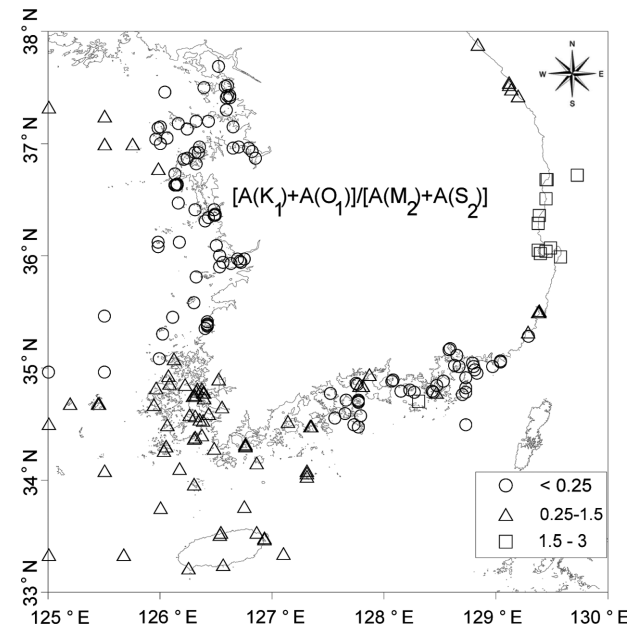


Fig. 3. Spatial distribution of form factor.

동해안의 북부와 남부 해역에서는 반일주조가 우세한 혼합형 조석특성을 보였다.

### 3. 비선형 조석의 공간분포

#### 3.1 비선형 분조의 생성과 분포

수심이 얇은 천해역에서 조석파는 바닥마찰, 분조 간의 상호작용 등에 의해서 변형된다. 대표적인 반일주조인  $M_2$  분조와  $S_2$  분조의 상호작용에 의한 비선형 분조들의 생성은 다음과 같은 식에 의해서 설명될 수 있다(Pugh, 1987).

$$\begin{aligned} & [A(M_2)\cos(\omega_1 t) + A(S_2)\cos(\omega_2 t)]^2 \\ &= \frac{1}{2}(A(M_2)^2 + A(S_2)^2) + \frac{1}{2}A(M_2)^2\cos(2\omega_1 t) \\ &+ \frac{1}{2}A(S_2)^2\cos(2\omega_2 t) + A(M_2)A(S_2)\cos(\omega_1 + \omega_2)t \\ &+ A(M_2)A(S_2)\cos(\omega_1 - \omega_2)t \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $A(M_2)$ 는  $M_2$  분조의 진폭,  $A(S_2)$ 는  $S_2$  분조의 진폭,  $\omega_1$ 은  $M_2$  분조의 각속도,  $\omega_2$ 는  $S_2$  분조의 각속도,  $t$ 는 시간이다.

식(1)에서 각속도가  $2\omega_1$ 인 분조는  $M_2$  분조 간의 상호작용에 의해서 발생하는 주기가  $M_2$  분조의 절반인  $M_4$  분조, 각속도가  $2\omega_2$ 인 분조는  $S_2$  분조 간의 상호작용에 의해서 발생하는 주기가  $S_2$  분조의 절반인  $S_4$  분조이다. 각속도가  $(\omega_1 + \omega_2)$ 인 분조는  $M_2$  분조와  $S_2$  분조간의 상호작용에 의해서 발생하는  $MS_4$  분조이고, 각속도가  $(\omega_1 - \omega_2)$ 인 분조는  $M_2$  분조와  $S_2$  분조간의 상호작용에 의해서 발생하는 장주기 천해 분조  $M_{sf}$ 로 주기가 14.77일이다. 이상과 같이 천해분조가 반일주조의 비선형 상호작용에 의해서 발생되며, 우리나라 연안해역에서는  $M_2$  분조와 관련된 천해분조가 서해안 일부지

역에서 크게 발생한다(Jung and Jeong, 2013). 비선형 분조의 분포 특성은 아래와 같다.

$M_2$  분조 간의 비선형 상호작용에 의해서 발생하는  $M_4$  분조와  $M_2$  분조와  $S_2$  분조의 비선형 상호작용에 의해서 발생하는  $MS_4$  분조의 진폭 공간분포(Fig. 4 & 5)는 다음과 같다. 한강하류의 국지적인 관측결과(Yoon et al., 2015)는 그림에 포함하지 않았다.  $M_4$  분조의 진폭이 서해 남부해역에서 전반적으로 약 20 cm 크기로 발생하였으며, 최대치는 27.1 cm이다. 한강하구에서도 크게 발생하여 인천항 인근에서는 약 10 cm이나 강화도 동쪽에 위치한 염하수로에서 최대 28.5 cm가 관측되었다(Yoon et al., 2015). 금강하구에서는 최대 18.7 cm가 관측되었다. 염하수로와 금강하구에서는 좁은 해역에서 발생하였으나 서해남부해역에서는 비교적 넓은 연안해역에서 발생하였다. 전반적으로 외해에서는 진폭의 크기가 작았으나 연안해역으로 접근하면서 진폭이 증가하였다. 진폭 증가는 세 지역 모두에 분포하는 넓은 조간대와 주로 관련되어 있을 것이다. Jung(2011)은 서해남부해역에서 비선형 조석의 생성요인에 대해서 조석 수치모델링을 통해서 조사하고, 간사지가 가장 큰 영향을 준다고 보고하였다.  $M_2$  분조와  $S_2$  분조의 비선형 상호작용에 의해서 생성되는  $MS_4$  분조의 진폭의 분포는  $M_4$  분조의 분포와 거의 유사하다. 서해남부해역과 염하수로에서 비교적 크게 발생하였으며, 금강하구해역에서는 크기가 작았다. 서해남부해역에서 관측된 최대 진폭은 28.6 cm로  $M_4$  분조와 크기가 비슷하였으며, 염하수로와 금강하구에서는 각각 최대 23.3 cm와 최대 10.3 cm로  $M_4$  분조의 진폭보다 작았다. 지금까지 우리나라 연안해역에서 보고된 비선형성 분조의 최대 진폭은 염하수로 상류인 한강하류에서 관측된  $M_4$  분조 36.6 cm,  $MS_4$  분조 29 cm,  $M_{sf}$  분조 52.6 cm이다(Yoon and Woo, 2012; Yoon et al., 2015).  $S_4$  분조의

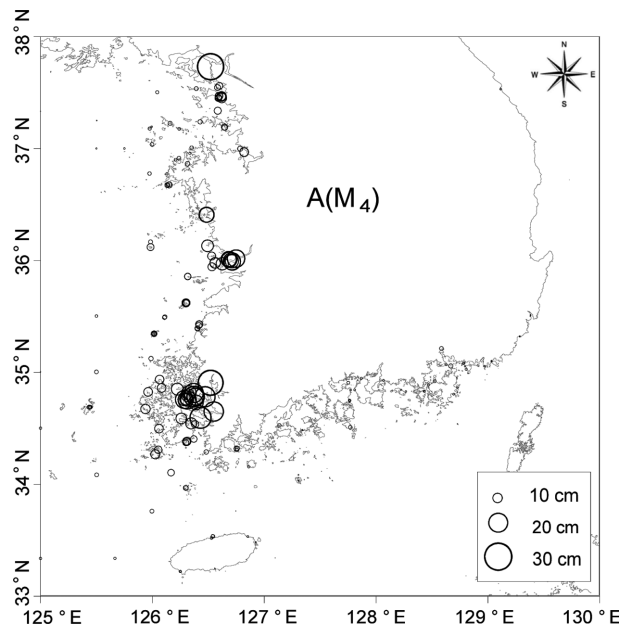


Fig. 4. Spatial distribution of  $M_4$  amplitude.

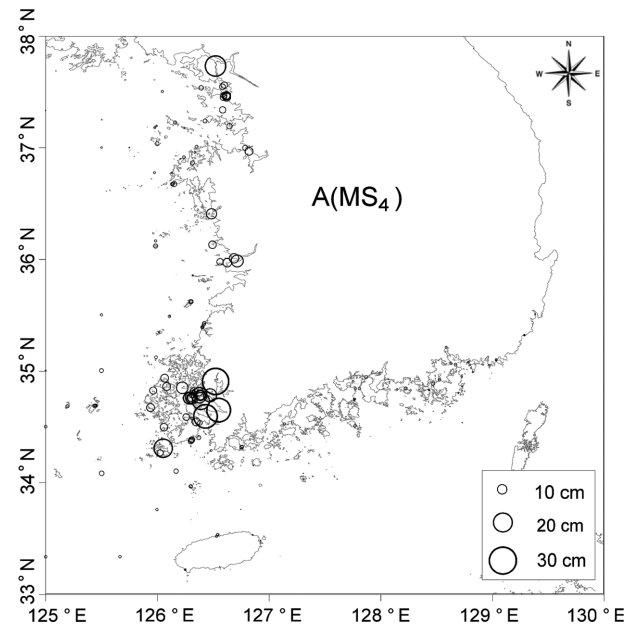


Fig. 5. Spatial distribution of  $MS_4$  amplitude.

진폭은 전반적으로 서해 연안해역에서 크지 않았으며,  $M_{sf}$  분조의 진폭도 한강하구를 제외하고는 크지 않았다.

외해로부터 조석파가 수심이 얇은 천해로 이동하면, 고조에서의 전파속도가 저조에서의 전파속도보다 빠르거나 늦어지면서 창조기간과 낙조기간이 다르게 된다. 바닥마찰의 영향이 적으면 고조에서 이동속도가 빨라지면서 창조우세현상이 발생하지만, 조간대로 인해서 바닥마찰의 영향이 커지면 고조에서 유속이 감소하면서 낙조우세현상이 발생하게 된다. 이러한 조석의 비대칭성은 바닥마찰, 수심변화, 단면변화 등에 의해서 발생하는 것으로 알려져 있다(Speer and Aubrey,

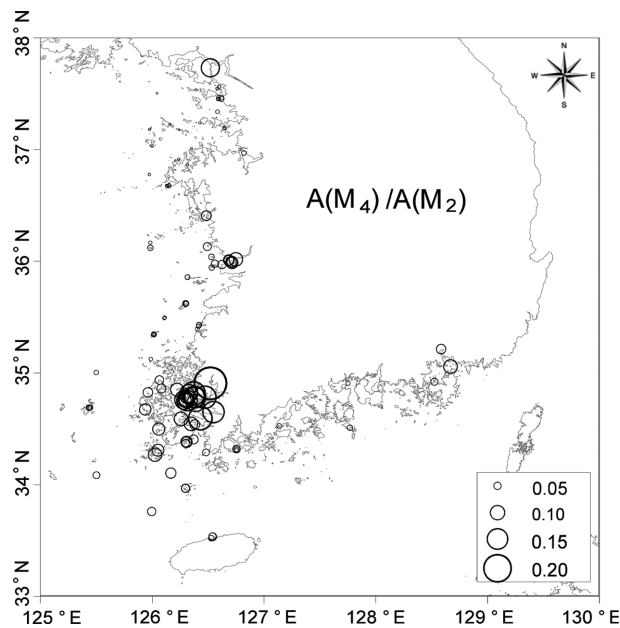


Fig. 6. Spatial distribution of amplitude ratio  $A(M_4)/A(M_2)$ .

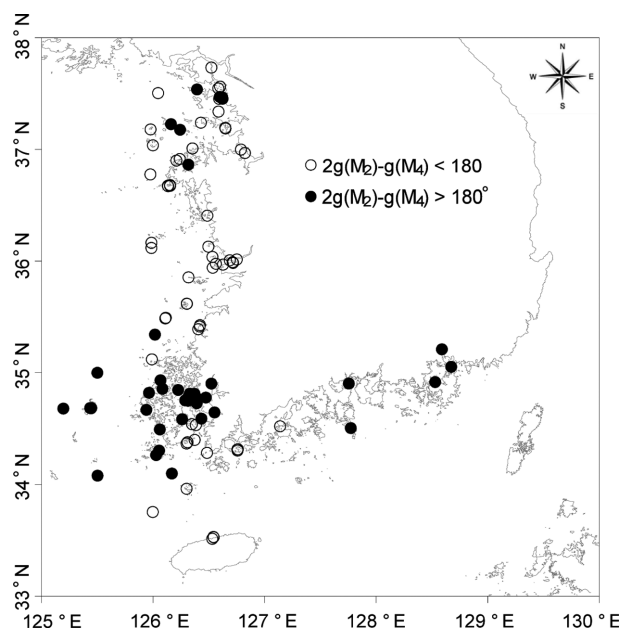


Fig. 7. Spatial distribution of phase difference of  $M_2$  and  $M_4$  constituents.

1985). 조석 비선형성과 비대칭성의 공간적인 분포특성을 조사하기 위해서  $M_4$  분조와  $M_2$  분조의 진폭비(Fig. 6)와 상대 위상차(Fig. 7)에 대해서 검토하였다. 비선형성의 정도를 평가하는 지표인 진폭비를 살펴보면, 목포 인근해역과 염하수로에서 비선형성이 크게 발생하고 있으며, 군산해역, 제주도 북쪽해역, 남해의 마산만에서도 크지는 않지만 비선형성이 발생하고 있다. 그림에는 포함되지 않았지만, 국내에서는 한강 하류에서 가장 크게 조석 비선형성이 나타나는 것으로 알려져 있다(Yoon et al., 2015). 서해남부해역에서 넓게 발생하는 조석 비선형성은 조석 수치모형을 적용하여 검토한 Jung (2011)의 연구결과에 의하면, 그 해역에 넓게 분포하는 간사지와 밀접한 관계가 있다. 조석의 비대칭성은  $M_2$  분조와  $M_4$  분조의 상대적인 위상차를 이용해서 분류할 수 있다(Speer and Aubrey, 1985). 반일주조가 우세한 해역에서  $2g(M_2)-g(M_4)$ 가 180도 보다 크면, 창조기간이 길어지고 낙조기간이 짧아지면서 낙조류의 크기가 증가하게 된다. 이러한 현상을 낙조 우세라고 한다. 반대로 180도 보다 작으면, 창조기간은 짧아지고 낙조기간은 길어지게 되어 낙조류는 작아지고 창조류가 커지게 된다. 이러한 현상을 창조 우세라고 한다. 두 분조의 상대위상차를 살펴보면, 서해남부해역과 인천 앞바다의 일부, 남해안의 일부에서 낙조 우세현상이 나타나고 있으며, 이 지역들을 제외한 서해안 대부분의 해역과 제주도 인근에서 창조 우세현상이 발생하고 있다. 수집된 자료에서  $M_2$  분조의 진폭이 3 cm 보다 작은 경우는 분석에서 제외하였다. 비선형성이 크게 나타나고 있는 해역을 중심으로 살펴보면, 강화도 인근해역과 군산해역에서는 창조우세 조석특성을 보이고 있으며, 목포인근의 서해남부해역과 남해안 일부에서 낙조우세 조석특성을 보이고 있다.

### 3.2 비선형 분조와 조석형태수

조석 비선형성과 비대칭성의 관계(Fig. 8)를 살펴보면, 조석의 비선형성은 창조우세해역보다 낙조우세해역에서 전반적

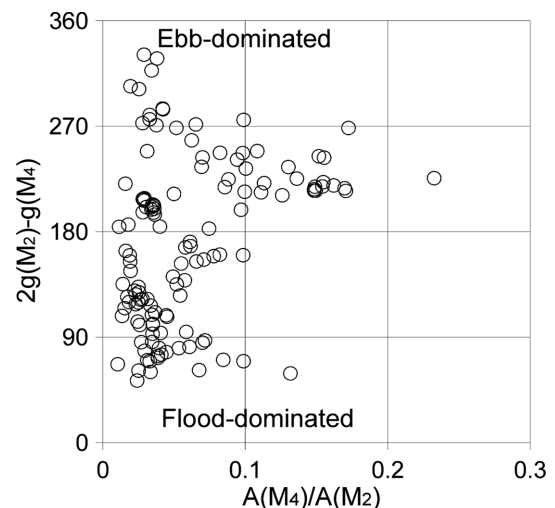


Fig. 8. Asymmetry against non-linearity of observed tide.

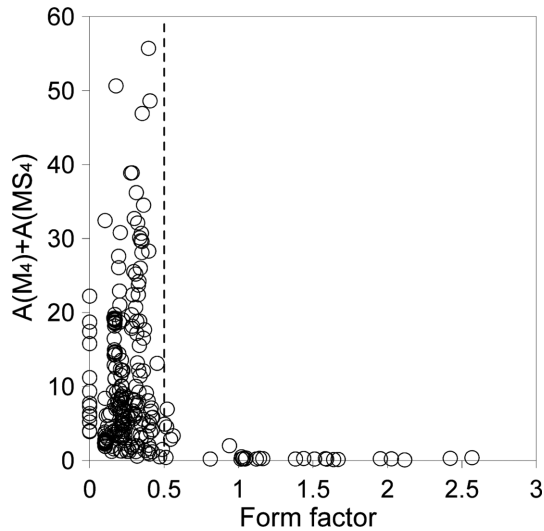


Fig. 9. Sum of  $M_4$  and  $MS_4$  amplitudes against form factor.

으로 크게 나타나고 있다. 진폭비가 0.1보다 큰 지점은 대부분 서해남부해역에 위치한 정점이며, 이 해역에서는 조석과가 외해로부터 연안의 천수역으로 접근함에 따라 비선형성과 비대칭성이 크게 증가하고 있다. 비선형 및 비대칭 조석의 발생과 조석형태수와 관계를 검토하였다. 비선형 조석인  $M_4$  분조와  $MS_4$  분조의 진폭 합과 조석형태수의 관계를 보면, 조석형태수 0.5 이하에서 비선형 조석이 주로 발생하였다(Fig. 9). 자세히 살펴보기 위해서  $M_4$  분조의 진폭에 대해서 조석형태수 0에서 0.6 사이를 확대해 보면, 반일주조형과 반일주조가 우세한 혼합형 조석의 경계치를 나타내는 조석형태수 0.25 부근인 0.15에서 0.45인 구간에서 대부분 발생하였다(Fig. 10). 조석 비대칭성과 조석형태수와 관계(Fig. 11)를 살펴보면, 조석형태수 0.4 미만의 구간에서 비대칭 조석이 주로 발생하고 있었으며, 비대칭성이 크지 않은 상대위상차 180도 부근에서 조석형태수가 커지는 모습을 보였다. 조석형태수가 0.25보다 큰 구간에서 값이 클수록 180도에 인접한 상

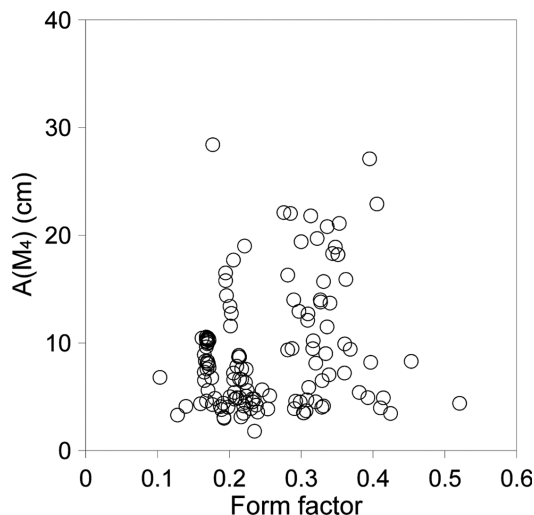


Fig. 10.  $M_4$  amplitude against form factor.

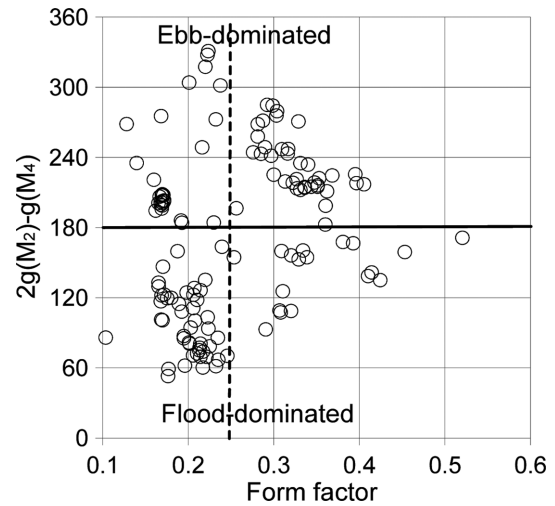


Fig. 11. Relative phase of  $M_2$  and  $M_4$  against form factor.

대위상차를 보였으며, 낙조우세형 조석은 조석형태수가 0.25보다 큰 반일주조가 우세한 혼합형 조석이 발생하는 구간에서 주로 발생하였으나 창조우세형 조석은 조석형태수가 0.25보다 작은 반일주조형 조석이 발생하는 지역에서 주로 발생하였다. 이상과 같은 결과를 종합해보면, 조석형태수가 0.5보다 큰 해역에서는 조석의 비선형성과 비대칭성이 거의 나타나지 않으며, 창조 우세현상은 반일주조형 조석이 발생하는 해역에서 발생하고, 낙조 우세현상은 반일주조가 우세한 혼합형 조석이 발생하는 해역에서 주로 발생한다.

### 3.3 비선형 조석으로 인한 고조위와 저조위의 변화

비선형 조석성분은 정현파로 평균해수면에는 영향을 주지

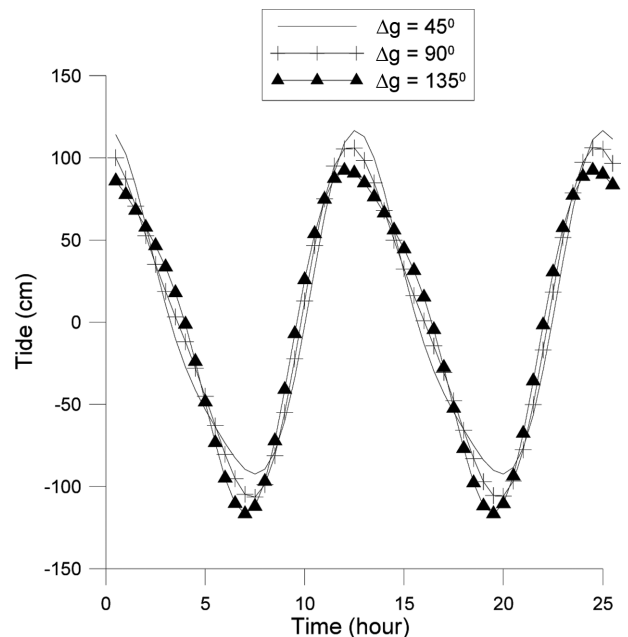


Fig. 12. Time variations of flood-dominated tide calculated with  $M_2$  amplitude of 100 cm and  $M_4$  amplitude of 10 cm ( $A(M_4) = 10$  cm).

않으나 조석과의 전체형태를 변화시켜 고조위와 저조위를 변화시킨다. 한 예로  $M_2$  분조의 진폭이 100 cm이고,  $M_4$  분조의 진폭이 20 cm인 조석이 서로 합성되어 나타나는 조석과의 형태를 보면, 창조 우세형 조석은 Fig. 12, 낙조 우세형 조석은 Fig. 13과 같다. 그림에서와 같이 창조시간은 짧고, 낙조시간이 길은 창조우세형 조석은 상대위상차가 135도에서 45도로 감소함에 따라서 창조시간은 짧아지고, 낙조시간은 길어지며, 고조위와 저조위가 모두 상승한다. 한편, 창조시간은

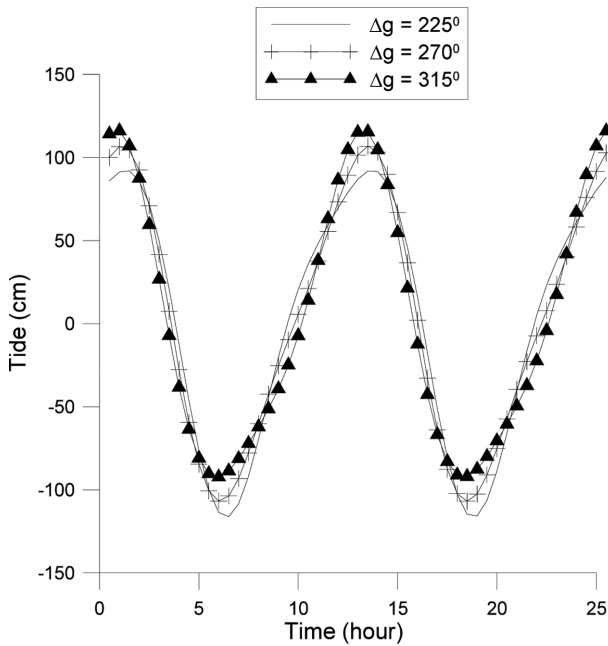


Fig. 13. Time variations of ebb-dominated tide calculated with  $M_2$  amplitude of 100 cm and  $M_4$  amplitude of 10 cm  $A(M_4) = 10$  cm.

길고, 낙조시간이 짧은 낙조우세형 조석은 상대위상차가 225도에서 315도로 증가함에 따라 창조시간이 길어지고 낙조시간이 짧아지며, 고조위와 저조위가 모두 상승한다. 따라서 비선형 조석성분인  $M_4$  분조와  $MS_4$  분조가 뚜렷하게 나타나는 해역에서는 반일주조와의 상대위상차로 인해서 고조위와 저조위가 변화하게 된다. 평균대조기 고조위( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $M_4$ ,  $MS_4$  분조의 합성조위의 최고치)는 비선형 분조의 영향으로 인해서 인천해역과 서해남부해역에서는 낮아졌으며, 군산해역에서는 높아졌다(Fig. 14). 목포해역에서 최대 21 cm, 인천해역에서는 최대 18.8 cm가 낮아졌고, 군산해역에서는 최대 15.3 cm가 높아졌다. 비선형 조석에 의한 영향을 평가하기 위해서, 4개 분조로 인한 1개월간 매시각 조위를 1개월간 계산하여 대조기 고조위와 저조위를 구하고,  $M_2$ 와  $S_2$  분조의 합성 조석에 의한 값과의 차이를 계산하였다. 평균대조기 저조위( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $M_4$ ,  $MS_4$  분조의 합성조위의 최저치)는 서해남부해역에서 비선형조석의 영향으로 뚜렷하게 낮아졌다(Fig. 15). 최대 하강치는 목포해역에서 48.5 cm에 달하고, 인천해역에서는 19.1 cm이다. 목포해역에서는 비선형 조석으로 인해서 저조위가 고조위 보다 크게 낮아졌으며, 군산해역에서는 고조위가 상승하였으며, 인천해역에서는 고조위와 저조위가 비슷한 크기로 낮아졌다. 평균대조기 조석간만의 차는 목포해역과 군산해역에서 증가하였으며, 증가치는 목포해역에서 최대 44.7 cm이다(Fig. 16). 군산해역에서는 저조위는 거의 변동하지 않았으나, 고조위 상승으로 인해서 대조차가 약간 증가하였다. 비선형 조석으로 인해서 고조위와 저조위 상승은 군산해역에서만 나타났고, 오히려 인천해역과 서해남부해역에서는 고조위와 저조위가 뚜렷하게 하강하였다. 특히 서해남부해역에서는 비선형 조석으로 인해서 고조위보다 저조위

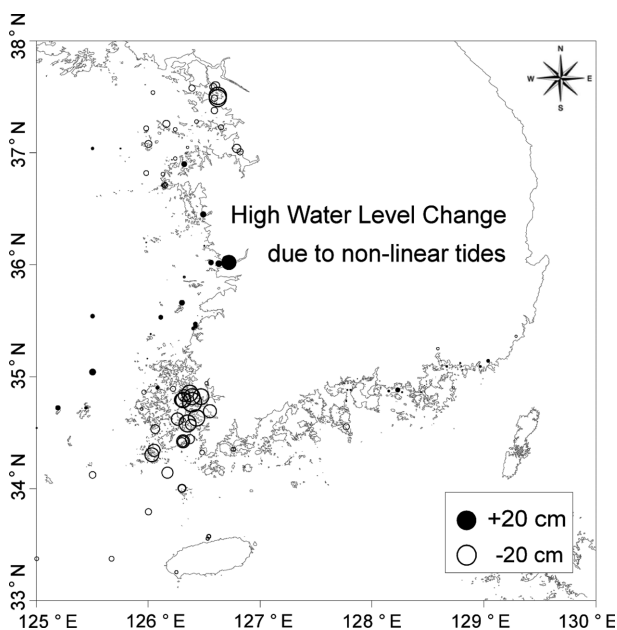


Fig. 14. Spatial distribution of high water level change due to non-linear tides in mean spring tide.

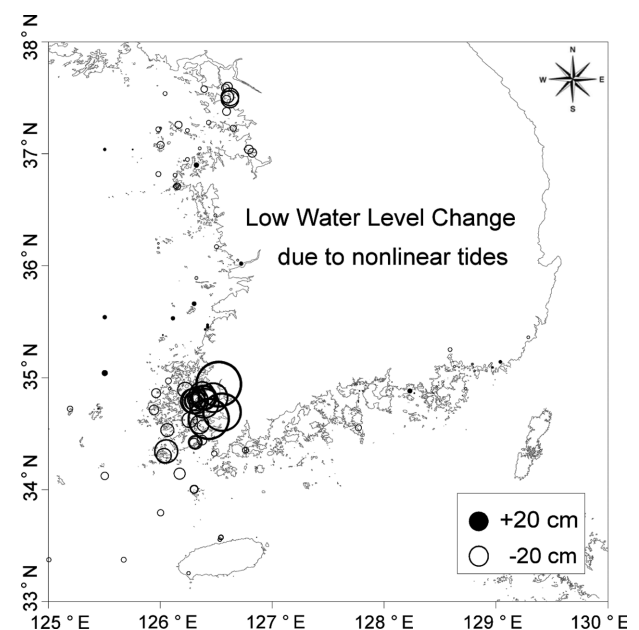


Fig. 15. Spatial distribution of low water level change due to non-linear tides in mean spring tide.

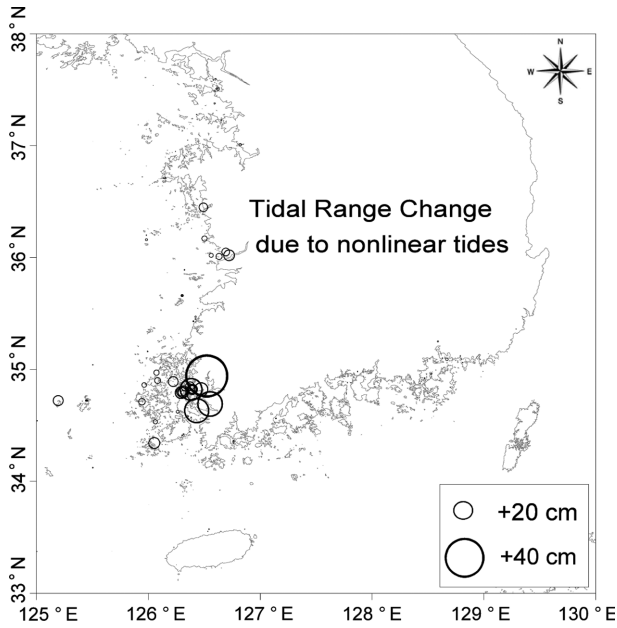


Fig. 16. Spatial distribution of tidal range change due to nonlinear tides in mean spring tide.

하강이 뚜렷하게 발생하였고, 이로 인해서 대조차가 확대되었으며, 조간대 면적이 확대되었다.

#### 4. 비선형 조석으로 인한 대조기 고조위와 저조위, 대조차의 시간변화

목포항과 군산외항에서 최근의 조석 조화상수 변화가 고조위, 저조위, 조차에 끼친 영향을  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $M_4$ ,  $MS_4$  분조의 조화상수를 활용해서 검토하였다.

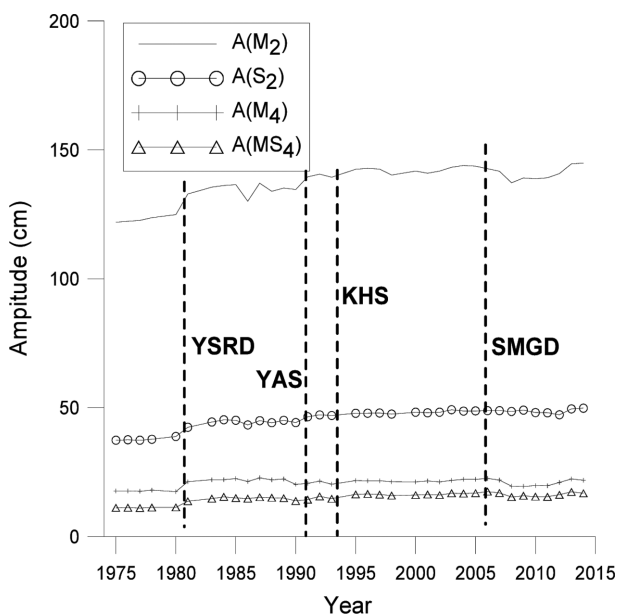


Fig. 17. Inter-annual variation of tidal amplitudes at Mokpo harbour.

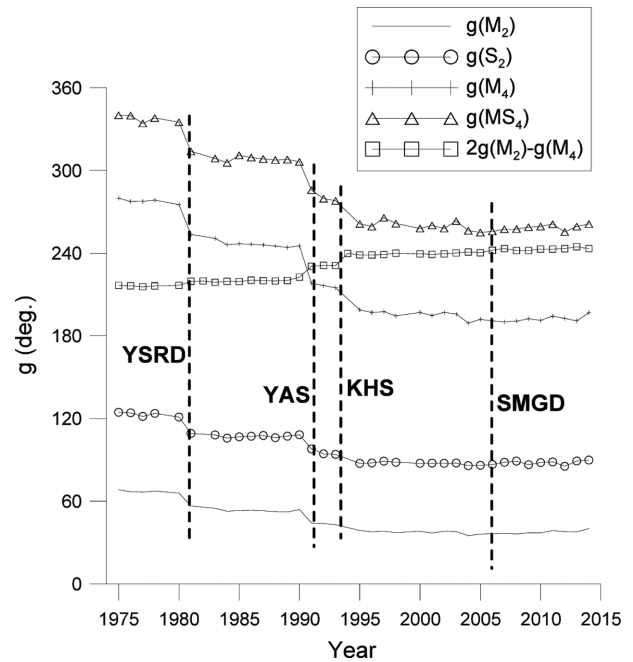


Fig. 18. Inter-annual variation of tidal phases at Mokpo harbour.

#### 4.1 목포항

목포항에서 반일주조와 비선형 분조의 조화상수 시간변화는 다음과 같다. 진폭 변화(Fig. 17)를 살펴보면, 반일주조인  $M_2$  분조와  $S_2$  분조의 진폭은 영산강하구언(YSRD) 준공시점에서 크게 증가하였으며, 이와 연동하여 비선형 분조인  $M_4$  분조와  $MS_4$  분조의 진폭도 뚜렷하게 증가하였다. 그 이후로는 영암방조제 준공시점에서 반일주조의 진폭은 약간 증가하였으나 비선형 분조는 거의 변화하지 않았고, 새만금방조제 준공 후에는 약간 감소하였다가 증가하였다. 새만금방조제 준공으로 위상은 거의 변화하지 않은 것으로 보아 방조제 건설의 영향 보다는 기후변화 등의 영향으로 인해서 변화된 것으로 사료된다.

위상 변화(Fig. 18)를 살펴보면, 영산강하구언 준공(YSRD), 영암방조제 준공(YAS) 시점에서 뚜렷하게 반일주조와 비선형 분조들의 위상이 빨라졌으며, 금호방조제 준공(KHS) 시점에서 약간 빨라지고, 그 이후에는 거의 변화하지 않았다. 이상과 같은 변화로 인한 조위변화를 살펴보기 위해서 영산강하구언 건설 전, 영암방조제 준공 전(영산강하구언 건설 후), 금호방조제 준공 후의 평균대조기 조위의 시간변화를 보면, 고조위는 지속적으로 상승하였으며, 저조위는 지속적으로 하강하였고, 낙조시간이 짧아져서, 낙조류 우세현상이 심화되었다(Fig. 19). 과거에 비해서 대조기 고조위는 상승하였고 낙조위는 하강하였으며, 조석간만이 차가 증가하였고, 위상은 빨라졌다(Fig. 20). 이러한 변화로 인해서 목포해역의 조간대 면적이 개발 전에 비해서 넓어졌다(Kang et al., 2005b). 새만금방조제가 준공된 이후에는 뚜렷하게 변화하지 않았으나, 변동성을 보이고 있어서 새만금방조제로 인한 영향성을 정확하게 평가하기 위해서는 조위자료가 더 축적되어 분석될 필요

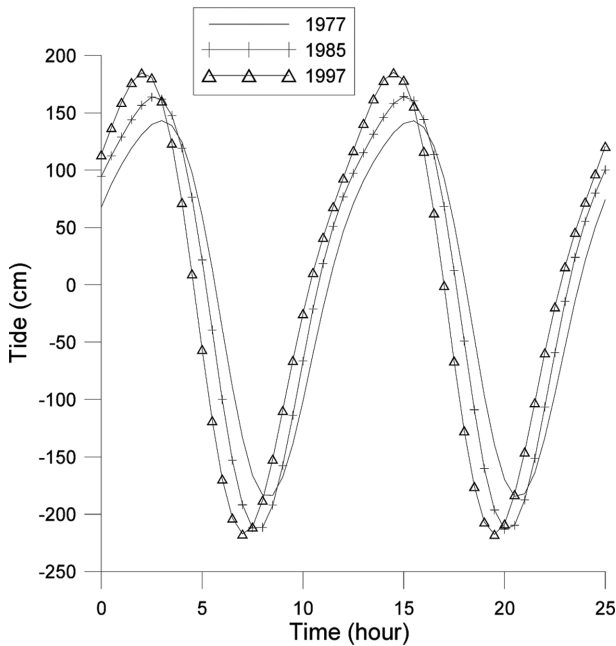


Fig. 19. Time variation of sea levels calculated with harmonic constants of  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $M_4$  and  $MS_4$  at Mokpo harbour.

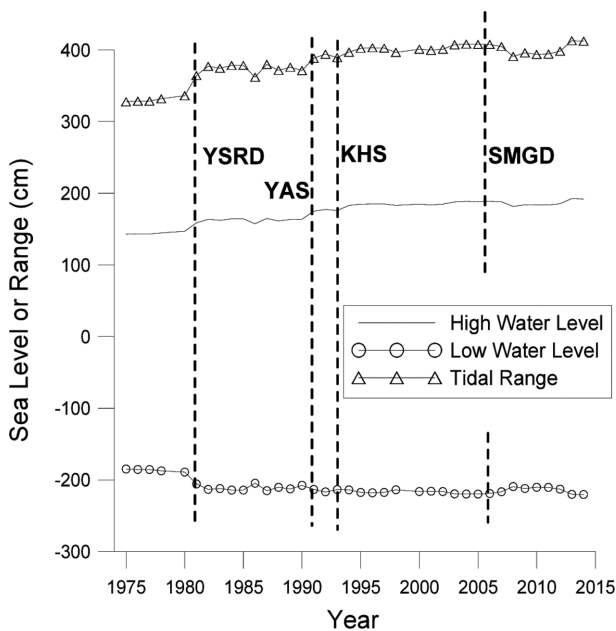


Fig. 20. Inter-annual variation of HWL, LWL and tidal range in spring tide at Mokpo harbour.

가 있다.

자세히 살펴보면 반일주조인  $M_2$  분조와  $S_2$  분조의 진폭 합은 영산강하구언 건설로 인해서 21.6 cm가 증가하고, 영암방조제와 금호방조제의 건설로 인해서 8.9 cm가 증가하여 총 30.5 cm가 3차례의 하구언과 방조제 건설로 인해서 증가하였다(Table 1).  $M_2$  분조의 위상은 영산강하구언 개발로 13.5도(약 28분)이 빨라졌으며, 영암방조제와 금호방조제의 개발로 14.9도(약 31분)이 빨라졌다. 전체적인 위상변화는 약 1시간에 달한다. 반일주조의 변화와 더불어 비선형 분조들의 진폭

Table 1. Tidal deformation in Mokpo

Year	$A(M_2 + S_2)$ (cm)	$g(M_2)$	$A(M_4 + MS_4)$ (cm)	$g(M_4)$
1977	160.0	66.6°	28.7	277.6°
1985	181.6	53.1°	37.4	246.9°
1997	190.5	38.2°	38.0	197.5°

Table 2. Change of low water level, high water level and tidal range of spring tide due to  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $M_4$  and  $MS_4$  in Mokpo (unit: cm)

Year	$\Delta H.W.L.$	$\Delta L.W.L.$	Tidal range	Observed $\Delta E.H.W.L.$ (Kang et al., 2006)
1977	-	-	-	-
1985	+21.0	-28.8	+49.8	+23.0
1997	+20.9	-3.2	+24.1	+25.0

도 증가하고, 위상이 빨라졌다. 이로 인해서 대조기 고조위, 대조기 저조위, 대조차가 변화되었다(Table 2). 4개 분조의 합성조석을 생성하여 구한 결과이다. 영산하구언 건설로 인해서 대조기 고조위는 21 cm가 상승하였고, 저조위는 28.8 cm가 하강하였으며, 대조차는 49.8 cm가 증가하였다. 영암방조제와 금호방조제 건설로 인해서 고조위는 20.9 cm가 상승하였고, 저조위는 3.2 cm가 하강하였으며, 대조기 조차는 24.1 cm가 증가하였다. 세 차례의 해안개발로 인해서 반일주조에 의해서 고조위가 30.9 cm 증가하고 저조위가 30.9 cm가 하강하였으나, 4개 분조의 합성조석에 의해서는 고조위가 41.9 cm 증가하고, 저조위는 32 cm가 하강하였다. 따라서 비선형 분조들에 의해서 고조위는 11 cm가 증가하고, 저조위는 1.1 cm가 하강하였다. 이와 같은 결과는 조위 관측결과를 분석해서 Kang et al.(2006)이 구한 구조물 건설로 인한 고조조위의 변화량인 영산강하구언 건설로 23 cm 증가하였고, 영암방조제와 금호방조제의 건설로 인해서 25 cm가 증가하였다는 연구결과와 대체로 일치한다. 또한, 본 연구결과는 1971년부터 2001년까지 목포항 조위 관측자료를 분석한 Byun et al. (2004)의 반일주조의 진폭 합이 하구언 건설전 160.6 cm, 방조제 건설전 181.6 cm, 방조제 건설후 189.3 cm로 변화했다는 결과와 거의 같으며, 비선형 분조에 대한 결과도 거의 일치한다. 일주조의 진폭과 위상은 거의 변화하지 않았다. 위상에 대한 결과도 대체로 본 연구결과와 거의 일치한다. 이 결과들로부터 목포항에서 고조위 변화는 반일주조와 비선형 분조의 변화에 의해 주로 발생했을 가능성을 추론할 수 있다.  $M_2$  분조와  $M_4$  분조간의 상대위상차는 영암방조제와 금호방조제 건설기간에 크게 증가하여, 180도로부터 더 멀어져서 낙조우세 현상이 크게 심화되었다. 목포항에서 평균해면 경년변화를 분석한 결과(Jung, 2014)에 의하면, 평균해면은 하구언과 방조제 건설로 인해서 총 0.9 cm가 증가하였고, 기후변화에 의한 1977년부터 1997년까지 20년간의 평균해면 상승량은 5.8 cm이다. 그 기간 동안 년평균상승량 2.9 mm/year (Jung, 2014)을 적용해서 산정한 결과이다. 따라서 평균해면



의 20년간 총상승량은 6.7 cm이다. 목포해역에서 고조위 상승은 평균해면 보다 조석변화에 의해서 주로 발생하였음을 알 수 있다. 비선형 분조로 인해서 반일 주조의 진폭변화인 30.5 cm 보다 큰 41.9 cm의 고조위 상승이 발생하므로, 목포 해역에서 설계조위 산정과 고조위 추정에는 다른 지역과 달리 비선형 조석의 영향을 포함해야 할 필요가 있다.

#### 4.2 군산외항

군산외항에서 반일주조와 비선형 분조의 조석 조화상수의 변화는 Fig. 21 & 22와 같다. 진폭변화를 살펴보면, 반일 주조의 진폭은 거의 변화하지 않았으나 최근에 새만금방조제 준공이후로  $M_2$  분조의 진폭이 약간 감소하였다. 비선형 분조

의 진폭은 거의 변화하지 않았다. 위상을 살펴보면, 금강하구언 준공이후로 반일주조와 비선형 분조의 위상이 서서히 빨라지는 모습을 보였다. 반일주조와 비선형 분조간의 상대위상차는 새만금방조제 준공시점에 약간 증가하였다가 감소하였다.

평균대조기 고조위와 저조위 변화(Fig. 23 & 24, Table 3)를 살펴보면, 금강하구언 건설로 인한 4개 분조의 변화로 인해서 고조위는 0.7 cm가 증가하고, 저조위는 5.9 cm가 하강하고, 조차는 6.6 cm가 증가하였다. 1996년 이후로는 고조위는 8.3 cm가 내려가고, 저조위는 8.9 cm 올라갔으며, 조차는 17.2 cm가 감소하였다. 2006년 4월에 새만금방조제가 체절되

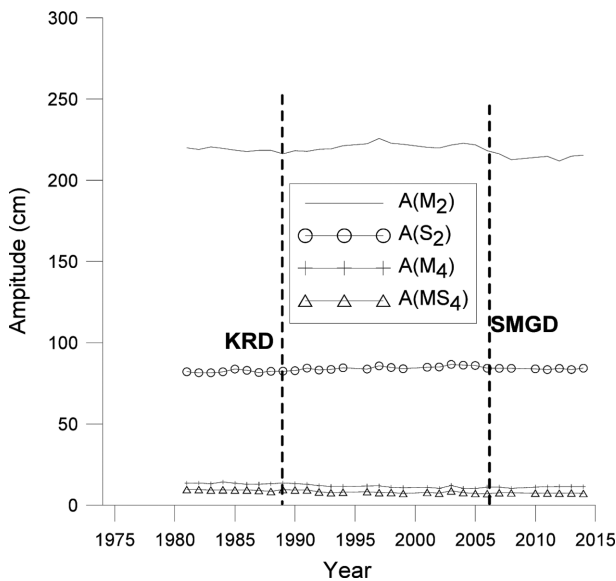


Fig. 21. Inter-annual variation of tidal amplitudes at Kunsan Outlet.

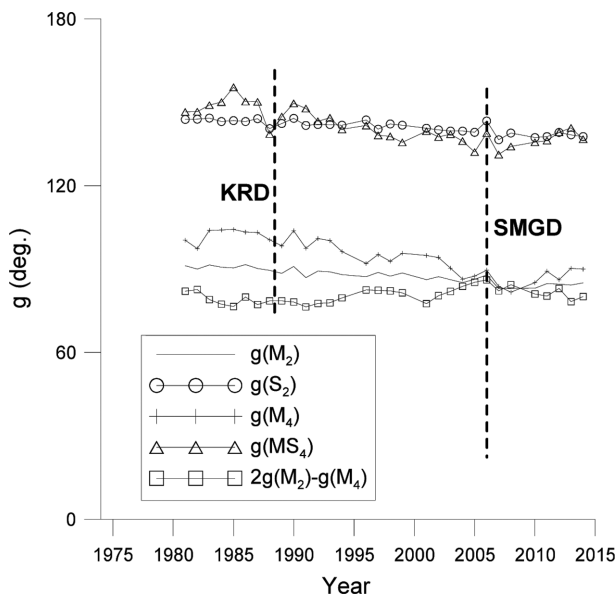


Fig. 22. Inter-annual variation of tidal phases at Kunsan Outlet.

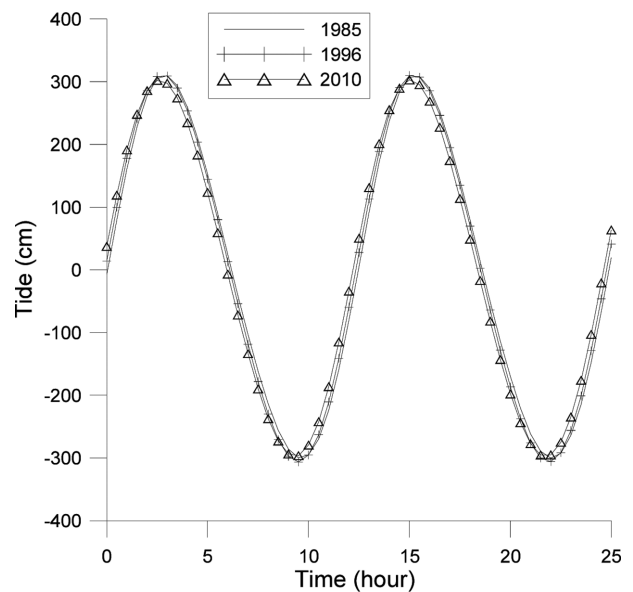


Fig. 23. Time variation of sea levels calculated with harmonic constants of  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $M_4$  and  $MS_4$  at Kunsan Outlet.

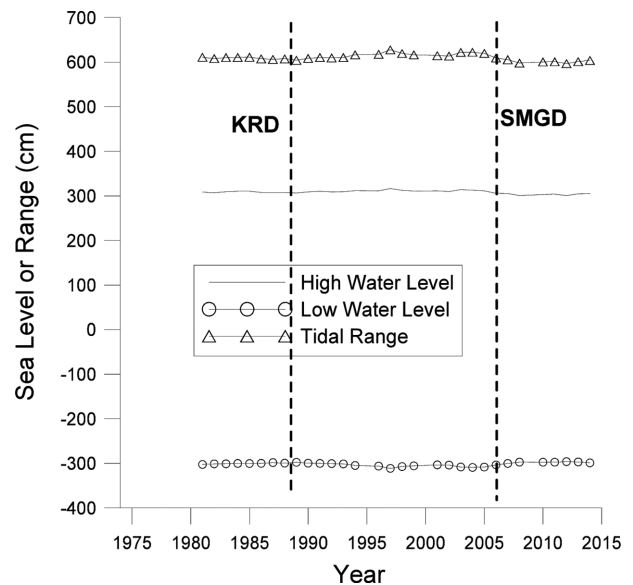


Fig. 24. Inter-annual variation of HWL, LWL and tidal range in spring tide at Kunsan Outlet.

**Table 3.** Change of low water level, high water level and tidal range of due to  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $M_4$  and  $MS_4$  tides in Kunsan Outport (unit: cm)

Year	$\Delta H.W.L.$	$\Delta L.W.L.$	Tidal range	Observed $\Delta E.H.W.L.$ (Kang et al., 2006)
1985	-	-	-	-
1996	+0.7	-5.9	+6.6	+2.0
2010	-8.3	+8.9	-17.2	-

고, 2006년 12월에 군산외항 조위관측소가 이전된 점을 감안하면, 이 시점에  $M_2$  분조의 진폭과 위상이 급격하게 감소하고 있어서 서서히 채질이 진행된 새만금방조제만의 영향이라기보다는 관측소 위치 이전으로 인한 영향이 포함된 것으로 보인다. Jung(2014)의 연구결과에 의하면, 군산외항에서 평균 해면은 금강하구언 건설로 1.5 cm, 새만금방조제 건설로 5.4 cm를 증가하였다. 이상과 같은 결과를 종합해 보면, 군산외항에서는 금강하구언 건설로 인해서 대조기 고조위가 2.2 cm가 증가하고, 대조기 저조위는 4.4 cm 하강하였으며, 조차는 6.6 cm가 증가하였다. 군산외항에서 조위 관측결과를 분석한 결과(Kang et al., 2005a)에 의하면, 하구언 건설로 인해서 군산외항에서 평균고조위가 외항에서는 5 cm가 상승하였으며, 평균해면은 1 cm 하락하였고, 평균저조위는 4 cm 하락하였으며, 평균조차는 9 cm가 증가하였다. 본 연구결과와 Kang et al.(2005a)와 고조위 변화에는 약간 차이가 있으나 경향성은 대체로 일치한다. 따라서 고조위와 저조위 변화가 4개 분조의 변화와 밀접하게 관련되어 있음을 확인할 수 있었다. 새만금방조제 건설로 인한 조위 변화를 모델링한 결과(Min et al., 2011)에 의하면, 군산외항에서  $M_2$  분조의 진폭은 약 4 cm 감소하고, 위상은 약 2도 빨라진다. 조위 관측결과를 분석해 보면,  $M_2$  분조의 진폭은 1996년 222.1 cm, 2010년 214.1 cm이고, 위상은 각각 87.2도와 83.1도이다. 차이 값은 진폭은 8.0 cm, 위상은 4.1도로 모델링 결과의 약 2배이다. 따라서 1996년부터 2010년 사이의 조위변화의 절반은 새만금방조제가 나머지 절반은 2006년 12월 조위관측소 위치이전으로 발생한 것으로 추정할 수 있다. 군산내항에 대한 정확한 평가는 본 연구에서는 포함하지 않았으나 내항 인근에 주거지가 집중되어 있는 점을 감안하면, 추후 관측결과 분석과 조석 모델링 등을 통해서 추가적으로 검토해야 할 것이다.

## 5. 결 론

전국 연안에서 대표적인 조석성분인 반일주조( $M_2$ 와  $S_2$ ), 일주조( $K_1$ 와  $O_1$ ) 그리고 비선형 분조( $M_4$ 와  $MS_4$ )의 진폭과 위상을 토대로 조석특성과 비선형 조석의 공간분포를 조사한 결과, 평균대조차는 최대 992 cm, 최소 19.8 cm이고, 비선형 조석은 서해 남부해역에서 주로 발생하였고, 한강 하류인 강화도 인근해역, 군산해역, 진해만 해역에서도 발생하였다. 대부분 해역에서  $M_2$  분조와  $M_4$  분조의 진폭비가 0.2 이하였으며,

조석형태수가 0.5 이하인 해역에서 비선형 조석이 주로 발생하였다. 특히 반일주조형과 반일주조가 우세한 혼합형 조석의 경계인 조석형태수 0.25 근처에서 비선형 조석이 크게 발생하였다. 낙조우세는 주로 조석형태수가 0.25보다 큰 구간에서 발생하였고, 창조우세는 0.25보다 작은 구간에서 발생하였다. 해안개발로 인한 반일주조와 비선형 분조의 변화로 인해서 목포항과 군산외항에서 고조위와 저조위 그리고 조차가 주로 변화되었음을 확인할 수 있었다. 목포항에서는 고조위가 41.9 cm 증가하였으며, 이 결과는 조위 자료를 분석한 고극조위의 변화량 48 cm와 대체로 일치한다. 따라서 목포항에서 고조위 변화는 주로 반일주조와 비선형 분조의 변화에 의해서 주로 발생하였음을 확인할 수 있었으며, 반일 주조와 비선형 분조의 변화로 인해서 영산강하구언 건설전에 비해서 평균대조기 저조위는 32 cm 하강하고, 평균대조기 조차는 73.9 cm 증가하였다. 군산외항에서는 금강하구언 건설로 큰 변화가 발생하지는 않았으나 새만금방조제 건설과 관측소 위치 이전으로 인해서는 고조위는 하강하고, 저조위는 상승하였다. 낙조우세현상이 뚜렷하게 나타나는 서해남부해역에서는 조차의 증가와 고조위 상승으로 인해서 자연재해에 대한 위험성이 증가하고 있어서 이에 대한 철저한 대책이 필요할 것이다. 현재 설계조위 산정에 있어서 비선형 분조의 영향을 포함하지 않고 있으나 목포해역과 같이 조석 비선형이 크게 나타나는 해역에서는 비선형 분조의 영향을 설계조위 산정에 적극 반영해야 할 것이다. 또한 낙조우세현상의 심화로 인한 해안 침식대책을 철저히 수립해야 할 것이다.

## 감사의 글

본 논문은 2016년도 한남대학교 학술연구지원비가 지원된 연구결과입니다. 국립해양조사원의 조석자료 제공에 깊이 감사드립니다.

## References

- Byun, D.S., Wang, X.H. and Holloway, P.E. (2004). Tidal characteristics adjustment due to dyke and seawall construction in the Mokpo Coastal Zone, Korea. *Estuarine, Coastal & Shelf Research*, 59, 185-196.
- Jang, D.H. and Kim, J.-S. (2009). Vulnerability assessment under the sea level rise based on climate change in Chungnam coastal area. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 16(2), 1-13.
- Jung, T.S. (2011). Numerical modeling of tide asymmetry in the southeast coastal zone of yellow sea. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 23(6), 429-441.
- Jung, T.S. (2014). Change of mean sea level due to coastal development and climate change in the western coast of Korean peninsula. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 26(3), 120-130.

- Jung, T.S. (2016). Inter-annual variation of tides on the western coasts of Korea. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 28(2), 81-91.
- Jung, T.S. and Jeong, J.K. (2013). Spatial distribution and time variation of  $M_2$  tide and  $M_4$  tide in the western coast of Korea. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 25(4), 255-265.
- Kang, J.W. (1996). Tide/tidal currents changes by construction of seadike/seawalls near the coastal zone of Mokpo. *Journal of Water, Coastal, and Environmental Engineering*, KSCE, 16(II-6), 611-619.
- Kang, J.W., Moon, S.R. and Oh, N.S. (2005a). Sea level rise at the southwestern coast. *Journal of Water, Coastal, and Environmental Engineering*, KSCE, 25(2B), 151-157.
- Kang, J.W., Moon, S.R. and Park, S.J. (2005b). Effects of tidal flat enlargement induced by tidal amplification. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 17(1), 47-54.
- Korea Hydrographic and Oceanographic Administration (2012). Annual Report of Korean Oceanographic Observation Network.
- Korea Hydrographic and Oceanographic Administration (2013). Annual Report of Korean Oceanographic Observation Network.
- Korea Hydrographic and Oceanographic Administration (2014). Annual Report of Korean Oceanographic Observation Network.
- Korea Hydrographic and Oceanographic Administration (2015). Annual Report of Korean Oceanographic Observation Network.
- Korea Hydrographic and Oceanographic Administration (2016). Annual Report of Korean Oceanographic Observation Network.
- Korea Maritime Institute (2012). Evaluation and Improvement of Coastal Areas' Climate Change Response Capabilities: with focus on climate change adaptation capability of coastal municipalities.
- Lee, S.W. (1983). *Physical Oceanography*. Jipmoondang, Korea.
- Min, B.I., Kim, K.O., Lee, H.S., Yuk, J.-H. and Choi, B.H. (2011). Disturbances in tidal and sedimentation regimes at saemangeum due to a dike. *J. of Coastal Research*, SI 64, 576-580.
- Nishida, H. (1980). Improved tidal charts for the western part of the north pacific ocean. Report of Hydrographic Researches, No. 15.
- Pugh, D.T. (1987). *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. John Wiley & Sons Ltd.
- Speer, P.E. and Aubrey, D.G. (1985). A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems Part II: Theory. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 21, 207-224.
- Suh, S.W. (1999). Shallow tides generation in the yellow sea by using a nonlinear three-dimensional harmonic finite element model. *Journal of Water, Coastal, and Environmental Engineering*, KSCE, 19(II-3), 389-399.
- Yoon, J.J. and Kim, S.I. (2012). Analysis of long period sea level variation on tidal station around the Korea peninsula. *J. of Korean Society of Hazard Mitigation*, 12(3), 299-305.
- Yoon, B.B. and Woo, S.-B. (2012). Analysis of tidal asymmetry and flood/ebb dominance around the yeomha channel in the han river estuary. *Journal of Korean Water Resources Association*, 45(9), 915-928.
- Yoon, B.I., Woo, S.-B., Kim, J.W. and Song, J.I. (2015). The regional classification of tidal regime using characteristics of astronomical tides, overtides and compound tides in the han river estuary, Gyeonggi Bay. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 27(3), 149-158.

---

Received 28 August, 2017

1<sup>st</sup> Revised 21 September, 2017

2<sup>nd</sup> Revised 13 October, 2017

Accepted 16 October, 2017